



TITLE:

強磁場下非中性プラズマを用いた多粒子系の緩和過程に関する制御実験

AUTHOR(S):

際本, 泰士

CITATION:

際本, 泰士. 強磁場下非中性プラズマを用いた多粒子系の緩和過程に関する制御実験. 2004

ISSUE DATE:

2004-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/80159>

RIGHT:

強磁場下非中性プラズマを用いた 多粒子系の緩和過程に関する制御実験

(課題番号 1 3 3 0 8 0 2 1)

平成 1 3 年度～平成 1 5 年度科学研究費補助金
(基盤研究 (A) (2))

研究成果報告書

平成 1 6 年 3 月

研究代表者 際 本 泰 士

(京都大学大学院人間・環境学研究科 教授)

目次

I. 研究組織	1
II. 研究経費	1
III. 研究発表	2
IV. 研究成果	9
1. 研究の背景と目的	9
1.1 背景と位置づけ	9
1.2 本研究以前の研究と限界	10
1.3 課題の設定	10
1.3.1 物理学の実験研究（第1の課題）	11
1.3.2 強磁場実験装置の建設と実験（第2の課題）	11
2. 研究成果のまとめ	14
2.1 物理学的研究（第1の課題）	14
2.2 強磁場閉じ込め装置の開発（第2の課題）	15
2.2.1 磁場発生装置	15
2.2.2 真空容器とトラップ電極の配位	16
2.2.3 計測系	18
2.3 強磁場装置における研究成果	19
2.3.1 Malmberg Trap としての特性	19
2.3.2 Mohri Trap としての特性 (Penning 平衡分布の形成)	20
2.3.3 多数渦糸群の形成	22
3. 添付資料リスト	23

I. 研究組織

研究代表者 際本 泰士（京都大学大学院人間・環境学研究科・教授）

研究分担者 田 中 仁（京都大学大学院エネルギー科学研究科・助教授）

早川 尚男（京都大学大学院理学研究科・助教授）

阿部 純義（筑波大学物理学系・助教授）

湯山 哲守（京都大学大学院人間・環境学研究科・助手）

道下 敏則（京都大学大学院人間・環境学研究科・助手）

伊藤 清一（広島大学大学院先端物質科学研究科・助手）

研究協力者 三瓶明希夫（京都大学大学院人間・環境学研究科・大学院生・
学術振興会特別研究員）

曾我 之泰（京都大学大学院人間・環境学研究科・大学院生）

青 木 順（京都大学大学院人間・環境学研究科・大学院生）

八柳 祐一（京都大学大学院人間・環境学研究科・
学術振興会特別研究員）

II. 交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合 計
平成13年度	28,400	8,520	36,920
平成14年度	6,800	2,040	8,840
平成15年度	3,300	990	4,290
総 計	38,500	11,550	50,050

III. 研究発表

(1) 学会誌等

- [1] Y. Kiwamoto, K. Ito, A. Sanpei and A. Mohri, "Two-dimensional Vortex Dynamics in a Potential-Confined Electron Plasma", Transactions of Fusion Technology Vol. 39, pp.119-126 (2001).
- [2] Y. Kiwamoto, K. Ito, A. Sanpei, "Controlled Experiment of Two-Dimensional Vortex Dynamics", J. Plasma Fusion Research, SERIES 4, pp.124-130 (2001).
- [3] A. Sanpei, Y. Kiwamoto, K. Ito, "Vorticity Hole Surrounding a Point Vortex", J. Plasma Fusion Research, SERIES 4, pp.545-549 (2001).
- [4] K. Ito, Y. Kiwamoto, A. Sanpei, "Determination of Stream Function of 2D Vortex in Nonneutral Plasma and Testing Sector Probe Signals", J. Plasma Fusion Research, SERIES 4, pp.550-554 (2001).
- [5] K. Ito, Y. Kiwamoto, A. Sanpei, "Field Analysis of Two-Dimensional Dynamics of Nonneutral Plasma with Imaging Diagnostics and Examination of Sector-Probing", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.40 pp.2558-2565 (2001).
- [6] Y. Kiwamoto, "What we can do with non-neutral plasmas?", Proc. Plasma Science Symposium 2001 / The 18th Symp. on Plasma Processing, Kyoto (Invited Talk) pp.759-760.
- [7] 際本泰士「非中性プラズマ中の渦運動」日本物理学会誌, 56 巻 4 号 pp.253-261 (2001).
- [8] 際本泰士「非中性プラズマの渦」プラズマ・核融合学会誌, 77 巻 4 号 pp.327-371 (2001).
- [9] A. Sanpei, Y. Kiwamoto, K. Ito, "Generation of Vorticity Hole Surrounding a Point Vortex", J. Phys. Soc. Jpn. Vol.70, pp.L2813-2816 (2001).
- [10] Y. Kiwamoto, K. Ito, A. Sanpei, Y. Soga, T. Yuyama, and T. Michishita, "Interaction of Electron vortices under the Influence of Background Vorticity Distribution", in *Non-neutral Plasma Physics IV* (AIP Conference Proceedings 606) pp.464-473. Invited talk at the *2001 Workshop on Non-neutral Plasmas*, University of California, San Diego July 30 - August 2, 2001.

- [11] K. Ito, Y. Kiwamoto, A. Sanpei, "Electron Vortex Dynamics and Two-Dimensional Field Analysis" in *Non-neutral Plasma Physics IV* (AIP Conference Proceedings 606) pp.474-479, Proceeding of *2001 Workshop on Non-neutral Plasmas*, University of California, San Diego July 30 - August 2, 2001.
- [12] Akio Sanpei, Kiyokazu Ito, Yukihiro Soga and Yasuhito Kiwamoto, "Characteristics and Generation Mechanism of Holes in an Extended Electron Vortex", in *Non-neutral Plasma Physics IV* (AIP Conference Proceedings 606) p480-485, Proceeding of *2001 Workshop on Non-neutral Plasmas*, University of California, San Diego July 30 - August 2, 2001.
- [13] Y. Kiwamoto, K. Ito, A. Sanpei, Y. Soga, "Strong Effects of Background Vorticity Distribution on the Dynamics of Coerent Vortices in Electron Plasma", *Physica Scripta* T98, pp.34-37 (2002). Invited talk at *International Topical Conference on Plasma Physics - New Plasma Horizons* -, at Faro, Portugal 3-7 Sept. 2001.
- [14] Y. Kiwamoto, A. Sanpei, K. Ito, "Bifurcation in the evolution of vortex structure in a magnetized pure electron plasma" in *Bifurcation Phenomena in Plasmas* pp.114-127, ed. by S. -I. Itoh and Y. Kawai, Kyushu University (ISBN 4-9901142-5-6) (2002).
Invited paper in the *Intenational Workshop on Bifurcation Phenomena in Plasmas* held at Fukuoka on Dec.3-5, 2001.
- [15] 際本泰士 “非中性プラズマで明らかにされる渦のダイナミクス” パリティ, 2002年1月号 (Vol. 17 No. 01) pp12-14. 「物理科学この1年」に選出.
- [16] Y. Yatsuyanagi, Y. Kiwamoto, T. Ebisuzaki, T. Hatori, T. Kato, "Simulations of diocotron instability using a special-purpose computer, MDGRAPE-2", *Phys. Plasmas*, Vol.10, No.8 pp.3188-3195 (2003).
- [17] A. Sanpei, Y. Kiwamoto, K. Ito, Y. Soga, "Formation of a Vortex Crystal Cell Assisted by a Background Vorticity Distribution", *Phys. Rev. E*. Vol.68, No.1-2, 016404 (6 pages) (2003).
- [18] Y. Soga, Y. Kiwamoto, A. Sanpei and J. Aoki, "Merger and binary structure formation of two discrete vortices in a background vorticity distribution of a pure electron plasma", *Phys. Plasmas*, Vol.10, No.10 pp.3922-3926 (2003).
- [19] A. Sanpei, Y. Kiwamoto, Y. Soga and J. Aoki, "Formation of a Triangle Vortex Configuration Assisted by a Background Vorticity Distribution", pp.106-111 in *Non-neutral Plasma Physics V*, ed. by M. Schauer, T. Mitchell and R. Nebel (AIP Conf. Proc. 692), Proc. of

2003 Workshop on Non-neutral Plasmas, University of New Mexico, Santa Fe July 7 - 11, 2003.

[20] Y. Soga, Y. Kiwamoto, A. Sanpei and J. Aoki, "Mechanisms of merger and binary structure formation of two discrete vortices in a nonneutral plasma", pp.112-117 in *Non-neutral Plasma Physics V*, ed. by M. Schauer, T. Mitchell and R. Nebel (AIP Conf. Proc. 692), Proc. of 2003 Workshop on Non-neutral Plasmas, University of New Mexico, Santa Fe July 7 - 11, 2003.

[21] Y. Yatsuyanagi, Y. Kiwamoto, and T. Ebisuzaki, " Numerical Study of Diocotron Instability with MDGRAPE-2", pp.87-92 in *Non-neutral Plasma Physics V*, ed. by M. Schauer, T. Mitchell and R. Nebel (AIP Conf. Proc. 692), Proc. of 2003 Workshop on Nonneutral Plasmas, University of New Mexico, Santa Fe July 7 - 11, 2003.

[22] 際本泰士：「非中性プラズマ科学への期待」プラズマ・核融合学会誌 Vol.79, No.12 pp.1249-1258 (2003).

[23] Y. Kiwamoto, A. Mohri, M. Fujiwara, "Equilibrium Density Distribution of a Two-Species Plasma with a Single Sign of Charge", J. Phys. Soc. Jpn. Vol.73, No.1 pp.102-106 (2004).

[24] J. Aoki, Y. Kiwamoto, Y. Soga and A. Sanpei "High Fidelity Optical Transfer System for Two-Dimensional Imaging of Density Distribution of a Pure Electron Plasma", accepted for publication in Jpn. J. Appl. Phys. (2004).

[25] Y. Kiwamoto, J. Aoki and Y. Soga, "Potential Distribution of Nonuniformly Charged Ellipsoid", to be published in Physics of Plasmas, Vol.11, No.10 (2004).

[26] J. Aoki, Y. Kiwamoto and Y. Soga, "Novel Application of Electron Vortex Dynamics to the Alignment of Magnetic and Machine Axes", submitted to Jpn. J. Appl. Phys. (2004).

(2) 口頭発表

[1] Y. Kiwamoto, K. Ito, A. Sanpei, Y. Soga, T. Yuyama, and T. Michishita, "Interaction of Electron vortices under the Influence of Background Vorticity Distribution", Invited talk at the 2001 Workshop on Non-neutral Plasmas, University of California, San Diego July 30 - August 2, 2001 (2002).

[2] K. Ito, Y. Kiwamoto, A. Sanpei, "Electron Vortex Dynamics and Two-Dimensional Field Analysis", Contributed paper at 2001 Workshop on Non-neutral Plasmas, University of California, San Diego July 30 - August 2, 2001.

[3] A. Sanpei, K. Ito, Y. Soga and Y. Kiwamoto, "Characteristics and Generation Mechanism of Holes in an Extended Electron Vortex", Contributed paper at *2001 Workshop on Non-neutral Plasmas*, University of California, San Diego July 30 - August 2, 2001.

[4] 三瓶明希夫, 際本泰士, 伊藤清一, "非中性プラズマ中の渦運動の画像計測と二次元解析" 核融合科学研究所共同研究研究会「画像計測 2001」, 2001/8/30-31, NIFS.

[5] 際本泰士, "純電子プラズマを用いた渦の研究" 日本物理学会 2001 年秋の分科会招待講演 (45 分, 徳島文理大学, 2001/9/17-20.

[6] 伊藤清一, 三瓶明希夫, 際本泰士, 曾我之泰, 八柳祐一, "へこんだ初期分布から展開する 2 次元渦度分布の不安定な発展" 日本物理学会 2001 年秋の分科会, 徳島文理大学, 2001/9/17-20, 18pRA-5

[7] 三瓶明希夫, 際本泰士, 伊藤清一, 曾我之泰, 八柳祐一, "背景渦度分布中の三本の渦糸の安定化", 日本物理学会 2001 年秋の分科会, 徳島文理大学, 2001/9/17-20, 18aRB-7.

[8] 伊藤清一, 際本泰士, 三瓶明希夫, "2 次元渦度分布の不安定な発展と構造形成" 第 5 回「プラズマ科学のフロンティア」研究会, 核融合科学研究所, 2001/10/10-12.

[9] 三瓶明希夫, 伊藤清一, 際本泰士, 曾我之泰, 青木順, "背景渦度分布中の 3 本の渦糸の時間発展および構造形成", 第 5 回「プラズマ科学のフロンティア」研究会, 核融合科学研究所, 2001/10/10-12.

[10] 伊藤清一, 三瓶明希夫, 際本泰士, 曾我之泰, "電子プラズマにおける二次元渦度分布の非線形発展と構造形成 Iーリング状初期分布からの非線形発展ー" 京都大学数理解析研究所共同研究集会「非線形波動現象の構造と力学」, 京都大学数理解析研究所, 2002/1/21-23.

[11] 三瓶明希夫, 伊藤清一, 際本泰士, 曾我之泰, "電子プラズマにおける二次元渦度分布の非線形発展と構造形成 IIー背景渦度分布中の 3 本の渦糸の時間発展および構造形成ー", 京都大学数理解析研究所共同研究集会「非線形波動現象の構造と力学」, 京都大学数理解析研究所, 2002/1/21-23.

[12] 三瓶明希夫, "電子プラズマにおける二次元渦度分布の非線形発展と構造形成" 九州大学応用力学研究所研究集会「流体现象と非線形現象論」, 九州大学応用力学研究

所, 2002/3/13-15.

[13] 際本泰士, “マグナス効果の「非中性プラズマ物理的」解釈”, 日本物理学会第 57 回年次大会, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス, 2002/3/24-27, 25aZB-7.

[14] 三瓶明希夫, 際本泰士, 伊藤清一, 曾我之泰, 青木順, “背景渦度分布中の渦糸の秩序構造形成”, 日本物理学会第 57 回年次大会, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス, 2002/3/24-27, 25aZB-9.

[15] 曾我之泰, 三瓶明希夫, 青木順, 際本泰士, 伊藤清一, “非中性プラズマの渦対形成機構 1”, 日本物理学会 2002 年秋の分科会, 中部大学, 2002/9/6-9, 6aSQ-1.

[16] 青木順, 三瓶明希夫, 曾我之泰, 際本泰士, 伊藤清一, “非中性プラズマの渦度分布計測用の光学系の検討”, 日本物理学会 2002 年秋の分科会, 中部大学, 2002/9/6-9, 6aSQ-2.

[17] 三瓶明希夫, 曾我之泰, 青木順, 際本泰士, 伊藤清一, “背景渦度分布中の 3 本の渦糸の時間発展および構造形成 II”, 第 6 回「プラズマ科学のフロンティア」研究会, 核融合科学研究所, 2002/10/9-11.

[18] 曾我之泰, 三瓶明希夫, 青木順, 際本泰士, 伊藤清一, “非中性プラズマの渦対形成機構”, 第 6 回「プラズマ科学のフロンティア」研究会, 核融合科学研究所, 2002/10/9-11.

[19] 青木順, 三瓶明希夫, 曾我之泰, 際本泰士, 伊藤清一, “非中性プラズマの渦度分布計測用の光学系の検討”, 第 6 回「プラズマ科学のフロンティア」研究会, 核融合科学研究所, 2002/10/9-11.

[20] Y. Kiwamoto, A. Sanpei, K. Ito, Y. Soga and J. Aoki, "Two-Dimensional Vortex Dynamics Experiments with Magnetized Pure-Electron Plasma", Invited Talk in *Mini Vortex Symposium*, held at Grad. School of Engineering, Kyoto University, Oct. 18 (2002).

[21] 三瓶明希夫, 際本泰士, “非中性プラズマにおける渦の秩序構造形成”, 「学際的新領域プラズマの基礎と応用」研究会, 東北大学, 2003/02/4-5.

[22] 曾我之泰, 三瓶明希夫, 青木順, 際本泰士, “非中性プラズマの渦対形成機構 2” 日本物理学会 第 58 回年次大会, 東北大学, 2003/03/28-31, 31pZL-6.

[23] 三瓶明希夫, 曾我之泰, 青木順, 伊藤清一, 際本泰士, 背景渦度分布中の渦糸の

秩序構造形成 II” , 日本物理学会 第 58 回年次大会, 東北大学, 2003/03/28-31, 31pZL-7.

[24] A. Sanpei, Y. Kiwamoto, Y. Soga and J. Aoki, "Formation of a Triangle Vortex Configuration Assisted by a Background Vorticity Distribution", Contributed paper at the *2003 Workshop on Non-neutral Plasmas*, University of New Mexico, Santa Fe July 7 - 11, 2003.

[25] Y. Soga, Y. Kiwamoto, A. Sanpei and J. Aoki, "Mechanisms of merger and binary structure formation of two discrete vortices in a nonneutral plasma" Contributed paper at the *2003 Workshop on Non-neutral Plasmas*, University of New Mexico, Santa Fe July 7 - 11, 2003.

[26] 八柳祐一, 際本泰士, 戎崎俊一, ” 背景渦中のクランプの運動と相互作用” , 日本物理学会 2003 年秋季大会, 岡山大学, 2003/09/20-23, 22aYB-01.

[27] 際本泰士, 青木順, 田中仁, 三瓶明希夫, 曾我之泰, 八柳祐一, 小澤龍馬, 佐藤博厚, 西原健, ” 強磁場で閉じこめた非中性プラズマの特性” , 日本物理学会 2003 年秋季大会, 岡山大学, 2003/09/20-23, 22pYB-06.

[28] 青木順, 際本泰士, 三瓶明希夫, 曾我之泰, 小澤龍馬, 佐藤博厚, 西原健, ” 強磁場中非中性プラズマ渦運動の高精度画像計測” , 日本物理学会 2003 年秋季大会, 岡山大学, 2003/09/20-23, 22pYB-07.

[29] 三瓶明希夫, 曾我之泰, 青木順, 八柳祐一, 小澤龍馬, 佐藤博厚, 西原健, 際本泰士, ” 非中性プラズマ渦の広域計測に基づく渦糸冷却過程の細密計測” , 日本物理学会 2003 年秋季大会, 岡山大学, 2003/09/20-23, 22pYB-08.

[30] 曾我之泰, 際本泰士, 三瓶明希夫, 青木順, 小澤龍馬, 佐藤博厚, 西原健, ” 回転電場駆動による非中性プラズマ密度分布の制御” , 日本物理学会 2003 年秋季大会, 岡山大学, 2003/09/20-23, 22pYB-09.

[31] 際本泰士, ” 非中性プラズマにおける自己組織化の起源” , プラズマ・核融合学会第 20 回年会シンポジウム「自己組織化の起源を問う」における講演 (I-4), 茨城県立県民センター (水戸市) 2003/11/25-28.

[32] 際本泰士, 青木順, 田中仁, 三瓶明希夫, 曾我之泰, 八柳祐一, 小澤龍馬, 佐藤博厚, 西原健, ” 強磁場に生成された純電子プラズマの特性と渦運動” , プラズマ・核融合学会第 20 回年会 27pB-02, 茨城県立県民センター (水戸市) 2003/11/25-28.

[33] 曾我之泰, 際本泰士, 三瓶明希夫, 青木順, 小澤龍馬, 佐藤博厚, 西原健, ” 波

動トルク付与で制御した純電子プラズマの輸送実験”，プラズマ・核融合学会第20回年会 28aA-23P，茨城県立県民センター（水戸市）2003/11/25-28.

[34] 八柳祐一，際本泰士，戎崎俊一，”純電子プラズマ中の渦クランプの安定性”，プラズマ・核融合学会第20回年会 28aA-24P，茨城県立県民センター（水戸市）2003/11/25-28.

[35] Y. Kiwamoto, "Critical Contribution of Low-Density Background Particles in the Formation of Ordered Structures in a Pure Electron Plasma", Paper O-4 in *13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion*, Toki, Japan, Dec. 9-12, 2003.

[36] J. Aoki, Y. Kiwamoto, A. Sanpei and Y. Soga, "Construction of High-aperture Optical System for Imaging Diagnostics of Pure Electron Plasma in Tesla-range of Magnetic Field and Its Application", Paper PII-80 in *13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion*, Toki, Japan, Dec. 9-12, 2003.

[37] Y. Soga, Y. Kiwamoto, A. Sanpei and J. Aoki, "Control of Density Profile of a Pure Electron Plasma by Application of External Torque", Paper PII-82 in *13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion*, Toki, Japan, Dec. 9-12, 2003.

[38] 八柳祐一，際本泰士，戎崎俊一，”正の渦対と負の渦対が共存した系の運動”，日本物理学会第59回年次大会，九州大学，2004/03/27-30，27aXH-07.

[39] 際本泰士，毛利明博，藤原正巳，”質量の異なる非中性混合プラズマの平衡密度分布”，日本物理学会第59回年次大会，九州大学，2004/03/27-30，29pWH-02.

[40] 曾我之泰，際本泰士，青木順，小澤龍馬，西原健，三瓶明希夫，”回転波動と結合した純電子プラズマの構造形成と輸送—波動の選択的受容—”，日本物理学会第59回年次大会，九州大学，2004/03/27-30，29pWH-03.

[41] 青木順，際本泰士，曾我之泰，小澤龍馬，西原健，三瓶明希夫，”強磁場で閉じ込めた非中性プラズマの特性 II—閉じ込め特性の検討—”，日本物理学会第59回年次大会，九州大学，2004/03/27-30，29pWH-04.

(3) 出版物

[1] 際本泰士：”非中性プラズマ”（分担），「プラズマの生成と診断」（プラズマ・核融合学会編，コロナ社刊）pp. 433-440（2004）.

IV. 研究成果

1. 研究の背景と目的

1.1 背景と位置づけ

自己組織化現象は色々な物質・流体において観測されており、物理学研究の最前線において活発に展開しつつあるテーマである。プラズマにおいても自己組織化に帰着され得る現象がよく知られている。例えば実験室において、電流分布や密度分布の自発的形成や磁気再結合が古くより知られている。宇宙プラズマにおいても同様な物理過程が発現している。また最近ではトロイダル・プラズマにおいて、初期流れの存在、およびそれにより引き起こされる局所的な構造の変容が外に向かうエネルギーや粒子の流れを妨害し（輸送障壁）、高圧力のプラズマの保持や閉込め効率の改善に有効であることが確信されるに至った。このような高性能閉じ込め状態を誘起し維持する物理機構の解明は核融合の実現をめざす開発研究において、またそれを支え科学としての敷衍化をめざす学術研究において重大な関心事となっている。

本研究で扱う純電子プラズマは非中性プラズマの代表的存在である。逆電荷の粒子が同居しないため粒子のみで電気的中性状態を実現することはできない。しかし粒子間の相互作用が長距離に及ぶクーロン力であること、それに伴って集団運動がマクロな挙動を支配することは通常の中性プラズマと同じである。磁場の中に捕捉された非中性プラズマは自身の密度分布により形成される電場によって、電場と磁場の両方に垂直な方向にドリフト運動を示す。このドリフト速度を持つ座標系においては電場が消えることは電磁気学の基礎知識である。つまりドリフト運動によって実効的に逆電荷の密度が存在する状態を作り出すと理解すれば、中性プラズマとの隔たりを縮めることができる。このような思考上の変換作業を加えると、非中性プラズマは中性プラズマと特質を共有するものであること、更に以下に述べる特徴によって、宇宙や実験室における高温中性プラズマの本質を理解するルートにおいて近道を提供するとみなすこともできる。

非中性プラズマは極めて長時間に渡って閉込めることができる。即ち、平衡からは離れた初期状態から、クーロン衝突による散逸等によって緩やかに熱平衡の状態に至るまでの長い時間帯に渡り、殆どの粒子が閉込め系の中に保持される。従って、異なる時間スケールと空間スケールで進行する緩和過程を、極めて制御よく眼前に展開させることができる。これは大きな利点である。自己組織化現象は数多くの物質について検討されているが、殆どの場合、注目する物理過程は微視的な緩和過程（衝突時間）より遥かに遅いか、遥かに速いかのいずれかに限られている。非中性プラズマは、初期の非平衡状態における高速の無衝突緩和過程も、粒子間のクーロン衝突に伴う散逸的な緩和過程も、よく制御された条件下で追跡することができる特色がある。さらに中性プラズマでは望むべくもなかったことであるが、非中性プラズマには熱力学が適用できるとの期待が高い。このように広い分野に渡って強い関心が持たれている物理的問題に、プラズマの特

色を活かして取組むことは、プラズマ理工学の学術的ポテンシャルを高めるうえで極めて重要である。

本研究は、自己組織化の物理の研究にとって好ましい特性を有する非中性プラズマを対象に、巨視的・微視的そして色々な時間スケールの計測を行って、この物理過程を更に深くかつ統一的に理解することを目指している。マクロな動的過程としては、プラズマの渦運動・渦間相互作用や不安定波動の非線形的成長と分岐過程が主要な研究対象である。さらにそれより緩やかな時間スケールでは、プラズマの密度分布が平衡状態に移行する過程が重要な物理課題である。このような問題意識を持ちつつ、平成 11-12 年度科研費基盤研究 (B) (2) 課題「非中性プラズマを用いた自己組織化する多体系の制御実験」で得られた成果を更に発展させたいとする目的をもって、平成 13-15 年度科研費基盤研究 (A) (2) として本研究課題は設定された。

1.2 本計画以前の研究と限界

平成 11-12 年度の研究はフラットトップ 2 秒で最大値が 0.048T の比較的弱いパルス磁場の中で行われた。簡素な構造の小さな閉じ込め装置において、純電子プラズマの初期密度分布を細密に制御する技術を開発し、2 次元渦運動の新しい局面を見いだすことができた。2 次元渦運動においては薄いシート状のフィラメント構造が密度分布のなかに急速に成長する。高い密度を持ち渦運動全体を特徴づける巨視的分布の時間展開にとっては、このフィラメント状の微細構造が極めて大きな影響を与えることが、平成 11-12 年度およびそれ以後の実験によってますます強く認識されつつある。ここで問題となるのは、渦運動の初期段階を通過する前にフィラメント分布の幅が電子のラーモア半径と同程度 (0.1mm) にまで減少することである。この状態になると、電子の円軌道に沿って電場は一様で無いから、案内中心が $E \times B$ ドリフトを行うとする近似が電子の運動に必要な精度で表し得ない。結果として電子集団を非圧縮性の 2 次元流体と考えることが出来なくなる。更に有限ラーモア半径の寄与は流体については散逸効果として現れるとも解釈できる。しかしながら、これらの非理想的過程をどのように評価し、物理的にいかに分離するかについては容易な回答は無い。そこで磁場強度を更に高めて、ラーモア半径を 0.01mm 以下に縮小した実験環境を作る必要性・物理的意義が強く認識された。

この時期の成果は以下に報告されている。

[1] Akihiro Mohri, Tetsumori Yuyama, Yasuhito Kiwamoto, Yohei Yamazawa and Toshinori Michishita, "Confinement of Nonneutral Plasmas in a Trap Composed of a Cusped Magnetic Field and an Electrostatic Octapole Field",
Japanese Journal of Applied Physics Vol.37 Pt.2, No.12B (1998) pp.L1553-L1555 (Letter).

[2] Y. Kiwamoto, K. Ito, A. Sanpei, A. Mohri, T. Yuyama, "2-D Interaction of Discrete Electron

Vortices", in *NONNEUTRAL PLASMA PHYSICS III* (AIP 1999) pp.99-105, ed. by J.J. Bollinger, R. L. Spencer and R. C. Davidson.

[3] Yasuhito Kiwamoto, Kiyokazu Ito, Akio Sanpei, Akihiro Mohri, Tetsumori Yuyama, and Toshinori Michishita, "Accelerated Merging of Electron Vortices in Background Vorticity", *Journal of Phys. Soc. Japan* Vol.68, No.12 (1999) pp.3766-3769 (Letter).

[4] Y. Kiwamoto, K. Ito, A. Sanpei and A. Mohri, "Dynamics of Electron-Plasma Vortex in Background Vorticity Distribution", *Phys. Rev. Lett.* Vol.85, No.15 (2000) pp.3173-3176.

[5] Y. Kiwamoto, K. Itoh, A. Sanpei and A. Mohri, "Two-dimensional Vortex Dynamics in a Potential-Confined Electron Plasma", *Transactions of Fusion Technology* (American Nuclear Society) Vol.39, No.1T, FUSTE8(1) (2001) pp.119-126.

1.3 課題の設定

本研究課題は実行のうえでは2つの作業に分けられる。その第1は非中性プラズマを用いて多粒子系の緩和過程の物理機構を実験的に究明することであり、その第2はこの研究における従来の実験的制約を取り除いて、更に基礎的かつ学際的な研究に発展する基盤を作ることである。第1の課題は第2の課題をベースにして更に大きく展開することが期待できる。しかしながら現実の枠のなかで第2の課題を達成するには、理想的に進捗しても2年間を必要とする。3年間の期限を設けた計画のなかで、間断なく学術的活動を維持しつつ将来の新しい発展の基盤を築くことが重要である。このような姿勢で第1のカテゴリーに属する研究活動を発展的に継続しつつ、そこで得られる問題点の克服を考慮に入れて第2の課題の達成に向けて最大限の努力を行使することとした。

1.3.1 物理学の実験研究（第1の課題）

従来の実験装置で検討できる課題としては、純電子プラズマに出現する2次元渦運動の学術的に有意義な局面を、案内中心近似の限界をわきまえつつ、出来る限り細密に計測し解析し広い学術的基盤の上に位置づけることである。具体的には以下の3項目を代表的な課題として設定した。

(1) 渦糸の結晶形成の基礎過程を、結晶ユニットとなる正三角形のセル構造の形成過程として捉えて、定量的に記述する。

(2) 渦結晶は混沌とした運動過程の時間に比べて遙かに長い時間のあいだ対称性の高い渦糸配位を維持する。この準定常状態は、運動期間に渦糸の合体を経て、構成渦糸の

数を減らした配位で順次再現する．渦糸の合体とある距離を隔てた共存の分岐は混沌とした運動と秩序過程とをつなぐ重要な過程である．この問題に焦点を当てた検討を進める．

(3) これまでの渦実験は，孤立状態の密度分布が初期分布から自発的に緩和する過程に注目してきた．将来の展開には緩和過程のなかに外力を加える手法を開発しておくことがきわめて有力である．例えば渦糸の位置関係の制御や 3 次元の Penning 平衡分布の制御に有効である．

1.3.2 強磁場実験装置の建設と実験（第 2 の課題）

第 2 の課題に含まれる小課題を具体的に小分けすると，以下のように列举される．物理課題を装置開発，実験技術開発，解析技術開発と対応させつつ述べることにする．

(1) **【ラーモア半径の縮小】** 乱流状態を二次元に縮約し，高度の制御を行いつつ実空間において詳細に計測できる純電子プラズマの渦運動は，流体力学と統計物理学が重なった領域を学術的に究明する立場から見ると，比類のない好材料である．特に高い密度部分を囲む低密度部分の運動が，高密度部分の示す対称性の高い構造の形成に強く影響することがこれまでの実験で見え始めていた．そのためには二次元理想流体の状態を細密な空間スケールまで拡張することが何よりも必要である．そこで本課題では少なくとも従来の 20 倍以上（1T 以上）磁場強度を高めることで制約を除こうとした．

(2) **【二次元条件の強化】** 渦を構成する電子密度分布の軸方向長さは，Malmberg Trap 配位において，両端に置かれた電位障壁の断面内分布で支配される．断面内で軸方向長さが一様でないと，渦を形成する電子集団は，横方向運動に伴って，軸方向の断熱圧縮・膨張を繰り返すことになる．これは二次元運動に新しいエネルギー源が加わることを意味しており，例えば Diocotron 振動が誘起されるなど状況を複雑化して厳密な議論ができなくなる．これを克服するには，電極内部断面を広くとり，捕捉された電子群から壁までの距離を大きくすることと，電極のバイアスに分布を与えて電位分布の整形を行うことが限られた手段である．具体的には電極の内直径を従来の 64mm から 90mm まで拡大し，閉じ込め域の軸方向長を従来の 210mm から最大 600mm まで拡張することとした．更に渦長は新しい制御パラメタとして重要であるため軸方向長は可変となるよう，壁の円筒電極は 24mm ピッチで分割することとした．両端の長い閉じ込め電極に隣接するこのリング電極を適切にバイアスすると，閉じ込め電位の平坦分布域を断面内において拡大することができる．

(3) **【多数渦糸群の形成】** 初期条件として渦糸の配置を設定することが実験の再現性を高めるために必須である．従来の実験では最大 19 本までを設定することができた．本課題では電極内径を広げる (2) の方向と調和させて，最大 37 本の渦糸を同時に設定

できるようにして、従来よりも次数の高い渦結晶の形成、およびこの自己組織化過程における背景分布の微細構造の寄与の検証をめざす。

(4) **【三次元平衡分布の形成】** デスクトップ規模では、恐らく非中性プラズマによってしか実現できないこととして、孤立した多粒子系の熱平衡分布の形成に関わる物理課題がある。これは集団的相互作用の現れとしての渦運動が更に緩和した状態に至る過程と位置づけられる。非中性プラズマにおいては、低温の極限において Penning 平衡解が解析的表現で得られており、平衡分布の実験的達成およびデータ解析の目安とすることができる。理論モデルで前提とした境界条件は Malmberg Trap では実現できなくて、Mohri Trap が有力な方策である。そこで (2) に述べたような軸方向に分割したリング電極にバイアス電位を分布させることにより Penning 平衡に近い分布を形成する。

(5) **【温度分布の制御】** Penning 平衡を実現するには、境界条件に加えてプラズマ粒子の温度を下げる事が明確な実験結果を得るためには重要である。レーザー冷却が可能なイオンとは違い内部構造を持たない電子に期待できるのはシンクロトロン放射冷却である。その $1/e$ 冷却時間は $(s) = 4/B(T)^2$ と評価されるから、2T の磁場であれば秒単位の冷却が期待できる。一方、温度分布は磁場を横切る断面内で形成するのが物理的には実現性が高く、磁力線方向に積分した電子数の測定に限られる画像計測の立場からも合理的である。そこで将来的には、電子ビームをパルスの形成される線アンテナとして利用した、電子サイクロトロン共鳴加熱が可能な配位を作る計画を立てている。既存のマイクロ波部品 (28GHz, 56GHz) が有効に利用できる磁場強度は 1T と 2T である。10mW 程度のマイクロ波により、背景温度 0.1eV の中に 1eV の高温域を局在形成するのは十分に可能である。

(6) **【計測法の開発】** 電子を磁力線に沿って捕集して電子数分布に比例した光子を放射する蛍光板を装置の大型化に対応して新たに拡大し、光量と電子数の対応関係を確立する必要がある。その一方で蛍光画像の記録技術にも新たな開発が必要である。強磁場環境においては真空容器の観測窓に CCD カメラを取り付けた従来の配置では、カメラを構成するモーター、冷却ファン、機械シャッターが適正に動作しない。弱磁場域に移動した位置から、低密度の電子分布に現れる細かな構造を判読するには、蛍光面の輝度分布を忠実にカメラまで伝送する明るい光学系を導入する必要がある。これも本計画のなかで自主開発すべき課題であった。

(7) **【三次元解析法の開発】** 計測で得られる一次データは、設定したエネルギー以上の電子についてその密度分布を磁力線に沿って積分した量にほぼ比例する、二次元の数値配列である。これを密度の線積分量に変換する方法は (6) に関連して確立する。ここで問題とするのは、この一次データから (エネルギーグループ分けされた電子の) 3次元密度分布を如何に得るかということである。この解析法は本課題の開始当初には漠然としたアイデアに留まっていたが、具体的な手法を確立するに至る。

2. 研究成果のまとめ

2.1 物理学的研究（第1の課題）

前節で設定した小課題についてはそれぞれ十分な成果を得ることができた．各成果を Full Paper としてとりまとめた．それぞれの記述を繰り返すことは避けて，課題ごとに添付資料を参照することにした．

(1) 非中性プラズマ科学を物理科学研究の中において位置づける試みを行った．添付資料 [Att.P-7] を参照されたい．

(2) 非中性プラズマを使った渦の物理学研究を概観するには，[Att.P-1] を参照されたい．

(3) 純電子プラズマの研究において我々が開発し活用してきた画像技術を駆使した計測法と解析法については，[Att.P-2] を参照されたい．

(4) 純電子プラズマの渦運動の物理的検討については，添付資料 [Att.P-3], [Att.P-5], [Att.P-6] を参照されたい．ここでは強い渦の背景を埋める弱い渦分布の中に発生する構造が強い渦の位置関係の対称化に強く影響することが主張されている．

(5) 外場によって純電子の密度分布に制御性を加える試みは，離散した複数個の渦糸の位置制御に関しては難しく，成功していない．単連結の密度分布については，その分布形状が波動を介して制御できることができた．しかもその過程のなかには，非局所的な固有波動の選択的励起，波動の運動量と粒子への移動，電磁場と荷電粒子が分け持つ正準角運動量を観測に即して理解しなおす，など学術的に有意義な未解決の課題が見つかった．研究はまだ緒に就いたばかりであるが，当面の成果を [Att.P-9] に報告した．

(6) 多粒子緩和過程において仮想的な摂動をあたえて機構解明の手がかりとするなど，実験における観測の限界を克服するために，多体系専用のコンピュータシミュレーションを導入した．非平衡の初期分布から不安定摂動が成長し，非線形的な構造が形成される過程を検討した結果を [Att.P-4] に報告した．

(7) 非中性プラズマの二次元渦運動の緩和過程の応用として，質量の異なる成分の混合体が到達する平衡分布を予測しようと試みた．これは例えば，高エネルギーの反陽子群を閉じ込めて電子で冷却し，反水素を形成しようとする国際的な研究プロジェクトにおいて重要な課題の一つである．この結果については [Att.P-8] を参照されたい．

2.2 強磁場閉じ込め装置の開発（第2の課題）

2.2.1 磁場発生装置

磁場は超伝導材のヘルムホルツコイルを組み合わせたセットにより発生する．直径 250mm のコイルボアの中心部，直径 100mm 長さ 600mm にわたり磁場強度の不均一は 0.7%p-p という設計が本装置のために行われた．磁場ベクトルの計測は容易でなく，確認の測定は通常のコイル製品の管理と同レベルに留まっている．ホール素子による次元計測では予定どおりの結果を示している．このような事情から電極の位置決めや磁力線のマッピングには磁場分布の設計値を利用する．現実の実験に即した軸合わせについては，これでは十分でないことは明らかであり，新しい技術を開発した．詳細は添付資料 [Att. P-12] に記述してある．

コイル線材の冷却はコイル冷却槽に直結したヘリウム冷凍機によって行い，ヘリウムは 5m ほどの配管で連結された圧縮機で循環する．常温から 3.5K までの冷却には約 2.5 日を要する．通電は永久モードではなく，2.2T の発生には 100A の電流が必要である．

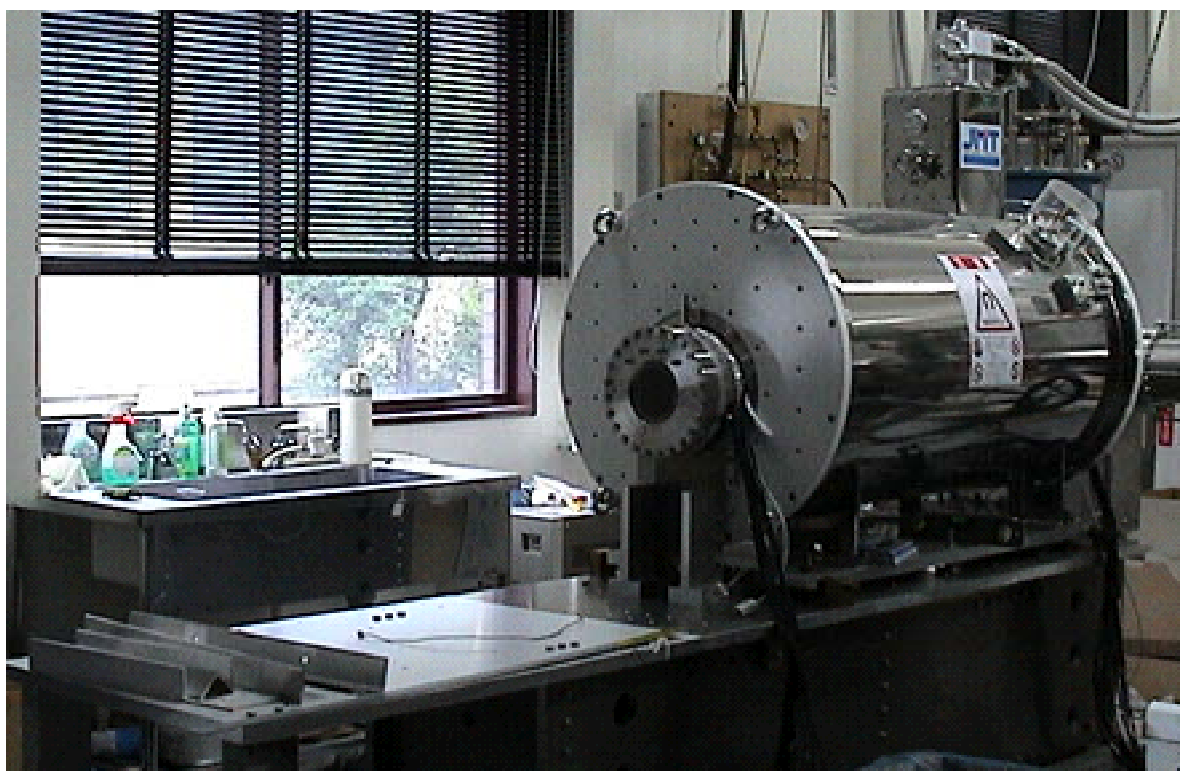


図 2.1 強磁場発生装置の概観（観測窓側から見る）

コイルボアの中に硬質アルミ製の真空容器を通し架台の上に絶縁して固定する．真空容器は電氣的絶縁をしたうえで，ターボポンプとクライオポンプで排気する．到達真空は現在までのところ $4 \times 10^{-7} \text{Pa}$ でありまだまだ改善の余地がある．この架台の上に直径が 20mm のボルト 6 本を用いて厚さ 25mm の硬質アルミの板を載せ，その上に磁場コイル

を固定している．これによりアルミ厚板は上下方向の位置調整が可能である．これに加えて，アルミ厚板は架台の水平面において軸方向・横方向にもボルト回転で移動可能としている．アルミ厚板に固定された磁場コイルはこれらのボルトを回転することにより3次的に位置，向きを調整し，架台に固定された真空容器と軸合わせができる機構となっている．軸合わせに関しては電子の渦運動を利用して新しい技術を開発した．これについては前述のとおり添付資料 [Att. P-12] に記述する．

2.2.2 真空容器とトラップ電極の配位

磁場コイルのボアに挿入する真空容器と，その内部に配置する電極の構成を図 2.2 に示す．真空容器の中，一様磁場部には軸方向にピッチ 24mm で内径 90mm のリング状の電極を 29 個並べる．（図 2.3 参照）リング間はセラミックのスペーサを挿入する．

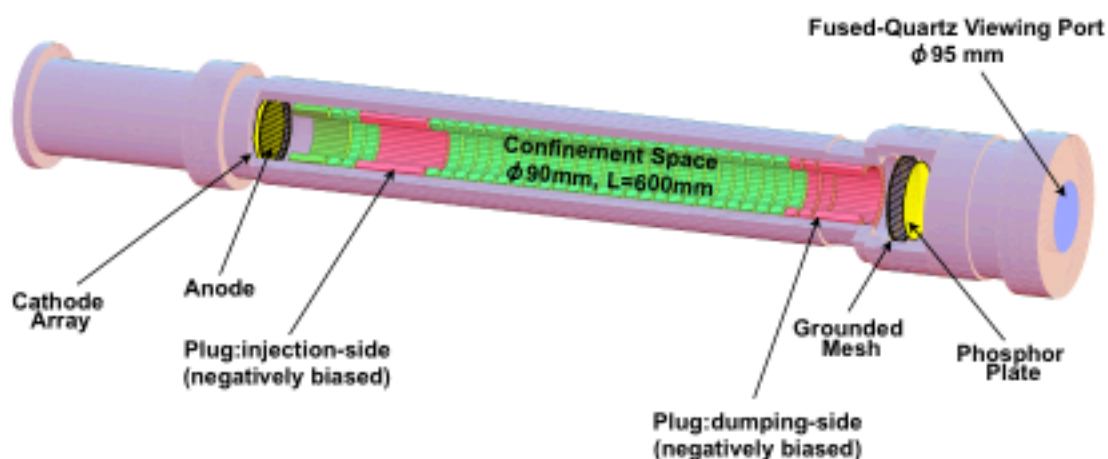


図 2.2 真空容器とトラップ電極の配置図

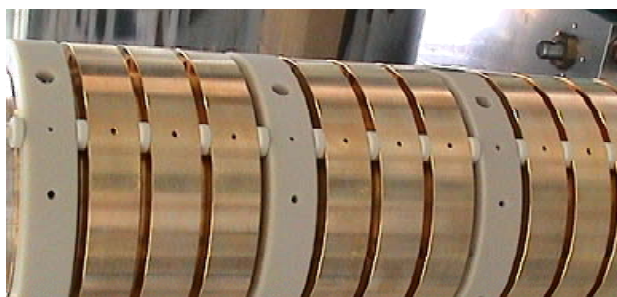


図 2.3 リング電極の配列



図 2.4 周方向分割電極

このうち 5 箇所リングは図 2.4 に示すように周方向に 4 分割して，セラミック（マセライト）製のサポートに固定する．分割電極は交流電場の送受信アンテナとして利用する．これらのリングの両端には長い円筒電極を置き電位障壁を作るプラグ電極として用いる．更にその外部の排気系につながる部分には 37 本のカソードの配列を設置し，渦

糸源として使う．カソードとプラグ電極との間には更に 2 個のリング電極をはさみ将来電子サイクロトン共鳴加熱などのために，閉じ込め域外部において高周波・マイクロ波でビームを変調する実験に備える．

リング電極や円筒状のプラグ電極はそれぞれ独立に外部回路と接続する．そのためには SMA ハーメチックコネクタとスナップコネクタを小フランジを介して接続し，図 2.5 に示すように真空容器壁を貫通して，リング電極に開けた接続穴に挿入する．このためには約 200 個の金属（リン青銅に金メッキ）部品，セラミック部品の工作精度を 20 ミクロンまで要求した．製作後の測定では 10 ミクロン以下が達成されていることを確認した．



図 2.5 電極との電気結合穴



図 2.6 カソードアレイを閉じ込め域から見る．（左）カソードの取り付け配置を裏側から見る．3mm 穴にカソードを埋め込み，M2 ビスで固定する．ヒータ電流は 5mm 幅のブスバーで供給する．（右）

カソードと反対側の端には実効直径 126mm の蛍光板を設置する．蛍光剤（日亜 Y203:Eu）はガラス板の上に塗布されており，611nm の輝線で発光する．蛍光面の表面には 50nm のアルミ膜が蒸着してある．この膜は電子を発光させるための加速電極としての役割と，電子を外部回路に抽出し帯電を避ける役割と，電子電流を検出して電子の総量を計測する役割を果たす．4kV 以上に加速された電子はアルミ膜を貫通して蛍光粒子に衝突し，電子数に相当する光子を発生する．つまり磁力線に沿って積分された電子密度が蛍光面で輝度分布に変換されるのである．しかし蛍光面にかけられた加速電圧は閉じ込めに必要な電位分布を乱すことになる．それを防ぐためにプラグ電極の外側には透過度が 90%の金属メッシュを接地して挟み込んでいる．

電子の入射と捕捉，保持，計測のための放出は各カソードの電圧，プラグ電極のバイアス電圧をパルス的に変動させて実行する．その動作の順序とタイミングはマスターパルスのあとに多数の遅延パルス発生器を連動させて作り出す．マイナス 200V の深さに至る駆動電圧パルスを 1 s 以下の過渡特性で実現するために，IGBT 素子を組み合わせたスイッチング回路を多数新規製作した．

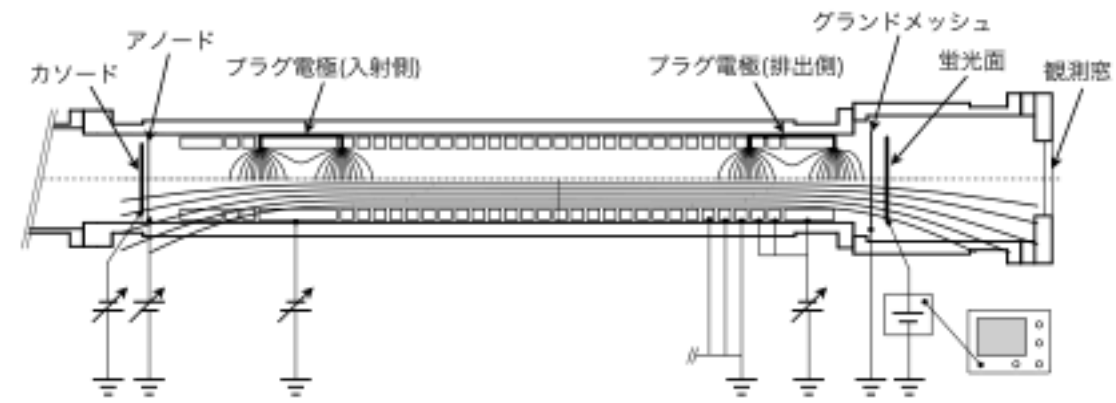


図 2.7 電極の配置, Malmberg Trap 配位の電位分布（上半分）と磁力線分布（下半分）

2.2.3 計測系

電子の密度分布に対応する輝度分布は観測窓から約 1m 離して弱磁場域に置かれた CCD カメラに 512 x 512 pixels の画素数で記録する．各画素当たりの最大容量は 60000 counts である．この画像伝送に用いる光学系の比較検討を行い，遠ざけた影響を取り戻すほどの明るさを持ち歪みの小さなレンズ系を開発した．詳細は添付資料 [Att. P-10] に述べる．この観測系の特徴は約 10 カウントほどのノイズレベルから 60000 カウントまで電子数に比例した計数特性を示すことである．一様磁場域に投影した空間分解能は pixel の大きさと数で支配されており，直径 50mm の視野を確保する場合は 0.1mm まで判別できる．渦運動で形成される微細な構造を検出した例を図 2.13 に示す．

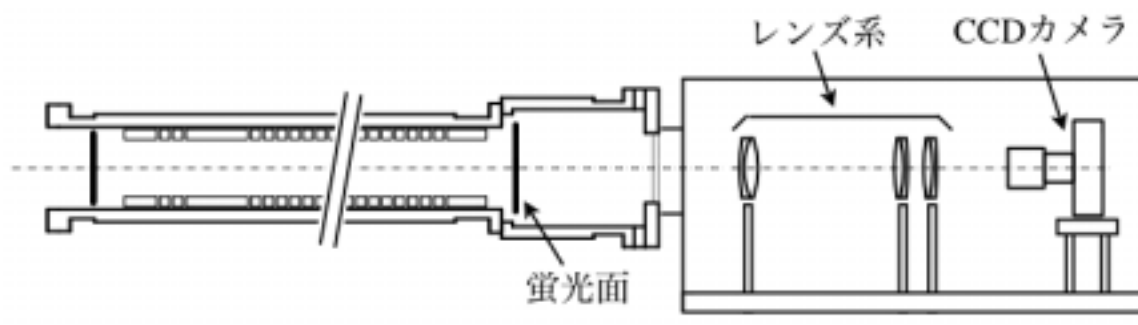


図 2.8 画像伝送光学系と CCD カメラの配位．

2.3 強磁場装置における研究成果

強磁場装置の組み上げと真空排気性・制御系の製作・統合を完了するまでにはほぼ2年間を要した。計画の2年目の終盤に入って、当初の予定どおり、強磁場のもとで純電子プラズマの閉じ込め実験を開始した。まず最大37本の糸状の電子分布で渦糸を作り、渦相互作用により形成される微細な構造を実際に観測できることを、磁場の最大値2Tまで確認した。将来の成果は装置の閉じ込め性能に強く依存するので、詳細な渦研究を始める前に閉じ込め特性を確認する作業に入った。閉じ込め特性はMalmberg Trap 配位とPenning 平衡配位 (Mohri Trap 配位) の2通りで検証した。

2.3.1 Malmberg Trap としての特性

一様な真空電位分布の軸方向長が550mmを超える純電子プラズマを形成可能な配位準備した。実際はこのように長いプラズマは断面分布が揺れ動き対称性を崩して変形することを観測した。閉じ込め時間は100秒以下であった。原因は2つあると考えられる。明らかな原因はmid-planeから2番目(36mm)の位置にあるリング電極がfloating状態になっていたことにある。(この故障は各リングを逐次プラグ電極として動作させ、負電位印加時に電子ビームの通過を遮断できない箇所を捜して同定した。)平成15年度末の分解点検で、このリング電極をバイアスするコネクタの心線が組み上げ時の過剰応力で断線していたことが判明した。修復は終わったが、この理由から、本報告書で記述される実験結果はすべて半分の長さ以内の短いトラップで得られたものに限られる。

もう一つの原因は、37本の渦糸を作るために新開発されたカソードアレイは大型化されており、トラップ域の真空排気コンダクタンスを減らす効果を持ったことにある。ポンプヘッドの圧力がプラズマ形成時に 8×10^{-7} Paであり、トラップ域はそれよりも1桁高い圧力と予想される。この場合残留ガスとの衝突による輸送が無視できない。こちらの問題は技術的に緩和可能であるが、多数渦糸の実験とトレードオフの関係にある。渦のダイナミクスの検討には数十秒の閉じ込め時間が確保できれば充分であるが、平衡への緩和が問題となる場合には限界がある。その解消には渦糸の本数を減らして小型化することが対策である。

更に実験の途上で判明したこととして、電極の対称軸と磁気軸の不一致がある。当初の軸合わせは、磁場コイルのボア内壁と真空容器の外壁との間を等間隔にする機械的な対称化に頼っていた。容器内への電極の搭載に要する空隙が最大0.5mm確保してあるからこれは軸ずれの原因とはなり得る。一方磁場コイルの軸とボアの軸との一致度は不明であった。大気側からは見ることでないこれらの軸ずれの評価は極めて難しく、実験を進めながら解答を探ってきた。平成15年度この課題に対しては、電子の渦運動の軌道が導体壁と局所的に同心円となる特性を利用した技術の開発によって、解答を得ることができた。この成果は論文化しており、資料[Att.P-12]として添付する。

軸合わせを行ったあと、断線した電極を避けて短くしたMalmberg Trap に対して閉じ

込め特性を検討したところ、閉じ込め時間は 200 秒まで改善した．問題はプラズマの蓄積過程と関連しているように理解される．トラップ域への電子の導入・蓄積は、複数個のカソードから短パルスの繰り返し入射と、パルス間に糸状分布間の渦合体を誘起する過程に依存している．この合体過程が強磁場化によって進行しにくくなり、数十秒の寿命で渦運動が持続するため、輸送過程が平衡状態よりはるかに大きいと解釈される．閉じ込め時間が磁場強度に対して二乗のべきよりも弱い依存性を示すのは、この渦輸送を反映しているのであろう．正に渦運動の研究との間のトレードオフが焦点となるゆえんである．

渦運動に関しては強磁場化によるラーモア半径の縮小に伴って、従来よりも細密なフィラメント状の構造が現れることを確認した．その評価についての限界は CCD カメラの解像度（512 x 512 のピクセル）にある．計測の面では高性能の画像伝送光学系を開発して（添付資料 [Att.P-10] 参照）新段階に既に対処しているので、今後はカメラの解像度の改善が克服すべき焦眉の課題となる．

2.3.2 Mohri Trap としての特性（Penning 平衡分布の形成）

平坦な井戸型の電位分布をもつ Malmberg Trap では中心軸の近くにおいては壁との距離以外には対称軸を定義する外部条件が存在しない．このことが二次元の渦運動実験を可能にしているのであるが、その一方で Diocotron 振動の成長を容易にして、径方向輸送を促進する原因ともなり得る．そこで電位分布が中心軸近くで $r^2 - 2z^2$ の形を持ち対称軸が明瞭に定義される Mohri Trap 配位を作って、Penning 平衡分布の実現を試みた．この試みのなかでは閉じ込め時間が 500 秒を超えた．残留ガスとの衝突が閉じ込め時間を制限していると解釈される．

そこで得られた配位の一例を図 2.9 に示す．断線の影響を避けるため、装置の左半分のみを使用している．従って右側は 5 つのリング電極をまとめてプラグ電極としている．中心部には後で述べる手法で決定した電子密度分布を示す．それを貫く曲線はプラズマの自己電位と真空場の電位を重ね合わせた電位の等高線を表す．プラズマ電位分布の計算には新しく開発した手法（添付資料 [Att.P-11]）を適用した．

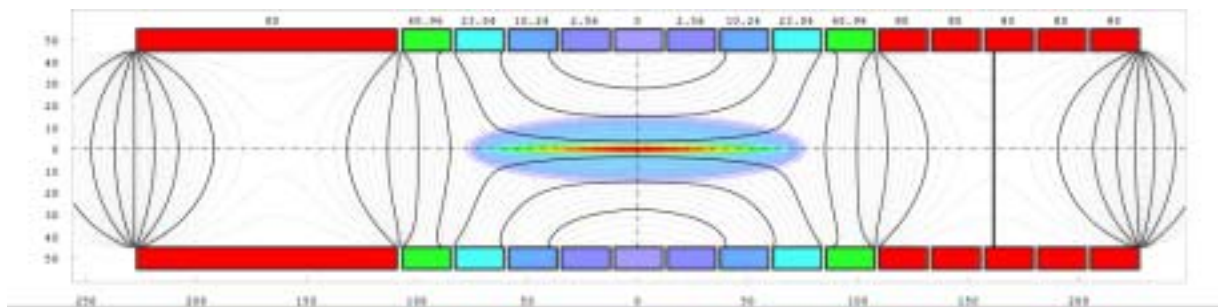


図 2.9 Mohri Trap 配位で形成された Penning 平衡分布

電子密度分布決定のベースとなるのは、新開発の画像計測系（添付資料 [Att.P-10]）を用いて記録した、軸方向に積分した密度分布である．一例を図 2.10 に示す．この分布

を軸からの距離（半径）の関数としてグラフ化すると図 2.11 の緑色の曲線となる．この分布を 3 つの楕円分布の重ね合わせとして近似してみる．その成分を番号をつけた 3 つの曲線で表す．その 3 成分の和が橙色の曲線となり実験結果と良く一致している．この分解は唯一解ではないが，密度分布の再現と同時にプラズマ内の電位分布と真空電位分布の和が磁場方向に一樣となる条件を課すと，任意性は殆ど無くなり，事実上唯一解とみなしてもよい結果が導かれる．

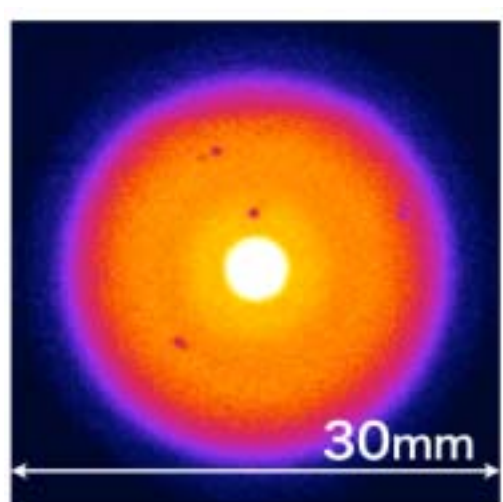


図 2.10 軸方向に積分された密度分布

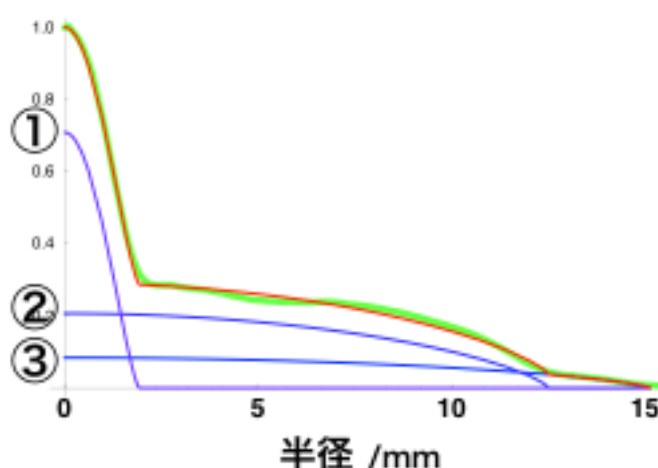


図 2.11 線積分密度の半径方向分布

この手続きで決定された密度分布を (r, z) 平面上の鳥瞰図として表したのが，図 2.12 である．高密度部はアスペクト比の大きな長い回転楕円体を成す．その周りには低密度の回転楕円分布があり，さらに低密度のハロー部がその外側に広がっていると解釈される．低密度成分ほどアスペクト比は小さくなる．この結論の信頼性に関しては更なる検討が必要とされることは言うまでもない．ただ，本研究計画のなかで建設した新しいトラップにおいて，新開発の計測技術を適用し，更に新開発のデータ解析法を適用して，Penning 平衡と認め得る密度分布がこのように高い空間分解能をもって同定されたことは，今後の研究の進展に大きなはずみを与えるものである．

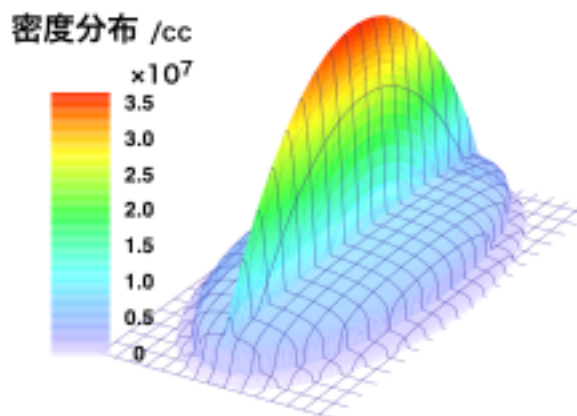


図 2.12 3次元密度分布の鳥瞰図

2.3.3 多数渦糸群の形成

最大 37 本の渦糸について、電子密度分布の時間変化を追跡することができた。画像の一例を図 2.13 に示す。この技術については添付資料 [Att.P-10] を参照されたい。

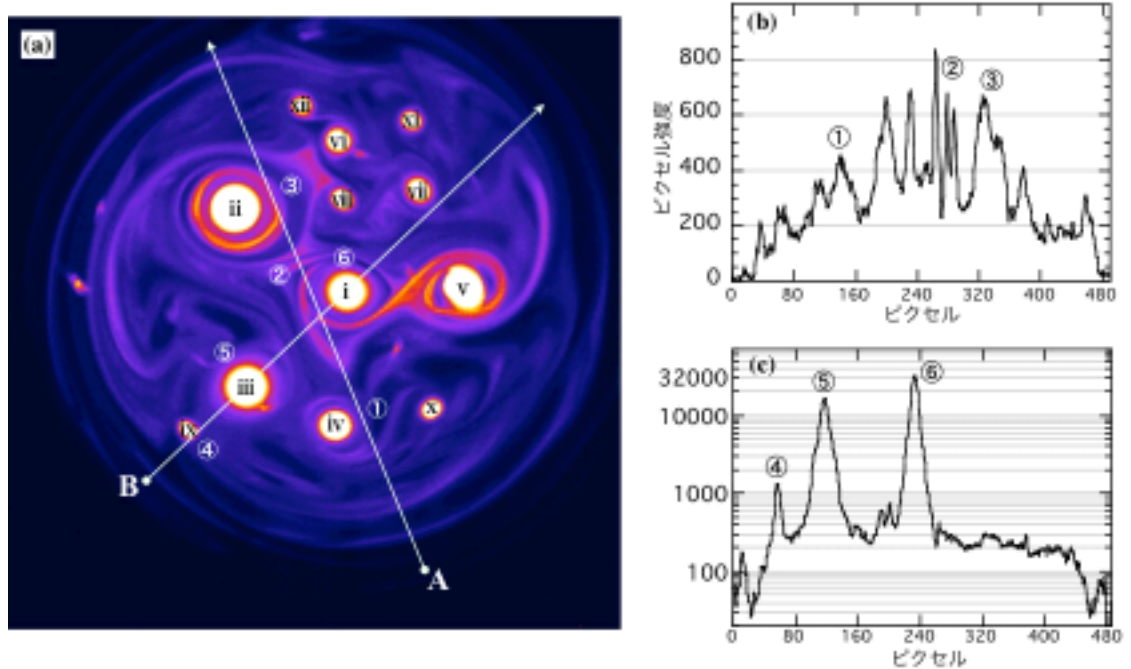


図 2.13 多数渦の運動の緩和過程における電子密度分布。磁場は 1T。左の画像において直線に沿った密度分布を右側のグラフに示す。10-20 カウントの揺動レベルと 30000 カウントを超えるクランプの分布が検出できる。計測系としては 60000 カウントまでの線形性を確認している。空間分解能は約 0.1mm/pixel である。

各時刻の分布を計測するたびに、閉じ込め状態を壊してその瞬間の密度分布を輝度分布として記録する現実験法においては、統計的にばらつきながら進行する密度分布を指定された実験室の時計に従って忠実に再現することは不可能である。これを補うには全空間を眺望できる広い視野をもって、低密度から高密度に渡る広い **dynamic range** で忠実にカメラの数値画像として記録することが何よりも重要となる。ここに示した渦の分布は当初に設定した要求を満たすものであり、今後の実験の技術基盤を成すものである。

3. 添付資料リストと要旨

- [Att.P-1] 際本泰士「非中性プラズマ中の渦運動」日本物理学会誌, 56 巻 4 号 pp.253-261 (2001).
- [Att.P-2] K. Ito, Y. Kiwamoto, A. Sanpei, "Field Analysis of Two-Dimensional Dynamics of Nonneutral Plasma with Imaging Diagnostics and Examination of Sector-Probing", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.40, pp.2558-2565 (2001).
- [Att.P-3] A. Sanpei, Y. Kiwamoto, K. Ito, "Generation of Vorticity Hole Surrounding a Point Vortex", J. Phys. Soc. Jpn. Vol.70, pp.L2813-2816 (2001).
- [Att.P-4] Y. Yatsuyanagi, Y. Kiwamoto, T. Ebisuzaki, T. Hatori, T. Kato, "Simulations of diocotron instability using a special-purpose computer, MDGRAPE-2", Phys. Plasmas, Vol.10, No.8 pp.3188-3195 (2003).
- [Att.P-5] A. Sanpei, Y. Kiwamoto, K. Ito, Y. Soga, "Formation of a Vortex Crystal Cell Assisted by a Background Vorticity Distribution", Phys. Rev. E. Vol.68, No.1-2, 016404 (6 pages) (2003).
- [Att.P-6] Y. Soga, Y. Kiwamoto, A. Sanpei and J. Aoki, "Merger and binary structure formation of two discrete vortices in a background vorticity distribution of a pure electron plasma", Phys. Plasmas, Vol.10, No.10 pp.3922-3926 (2003).
- [Att.P-7] 際本泰士: 「非中性プラズマ科学への期待」プラズマ・核融合学会誌 Vol.79, No.12 pp.1249-1258 (2003).
- [Att.P-8] Y. Kiwamoto, A. Mohri, M. Fujiwara, "Equilibrium Density Distribution of a Two-Species Plasma with a Single Sign of Charge", J. Phys. Soc. Jpn. Vol.73, No.1 pp.102-106 (2004).
- [Att.P-9] Y. Soga, Y. Kiwamoto, A. Sanpei and J. Aoki, "Radial Compression of Density Profile of a Pure Electron Plasma by Application of External Torque", to appear in J. Plasma Fusion Research, SERIES 6 (2004).
- [Att.P-10] J. Aoki, Y. Kiwamoto, Y. Soga and A. Sanpei "High Fidelity Optical Transfer System for Two-Dimensional Imaging of Density Distribution of a Pure Electron Plasma", accepted for publication in Jpn. J. Appl. Phys. (2004).

[Att. P-11] Y. Kiwamoto, J. Aoki and Y. Soga, "Potential Distribution of Nonuniformly Charged Ellipsoid", to be published in Physics of Plasmas, Vol.11, No.10 (2004).

[Att. P-12] J. Aoki, Y. Kiwamoto and Y. Soga, "Novel Application of Electron Vortex Dynamics to the Alignment of Magnetic and Cylinder Axes", submitted to Jpn. J. Appl. Phys. (2004).

添付資料論文の要旨

[Att.P-1] 際本泰士「非中性プラズマ中の渦運動」日本物理学会誌，56 巻 4 号 pp.253-261 (2001).

非中性プラズマ中に現われる渦運動について最近の実験結果を報告する．電子のみで構成される電子プラズマの，強磁場に垂直な平面内での二次元運動は，高レイノルズ数の非圧縮性 Euler 流体と等価であり，電子密度が渦度に，電位が流れ関数に比例する．この特徴を活かして，渦糸間の相互作用とそれに対する背景渦度分布の効果を画像計測を駆使して検証する．渦糸が背景渦を介して合体したり，近接した安定な渦対となったり，結晶構造を形成したりする様子を紹介する．電磁気学を適用して詳細な定量解析ができることも報告する．

[Att. P-2] K. Ito, Y. Kiwamoto, A. Sanpei, "Field Analysis of Two-Dimensional Dynamics of Nonneutral Plasma with Imaging Diagnostics and Examination of Sector-Probing", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.40, pp.2558-2565 (2001).

The linear response of the luminosity of the charge-coupled-device (CCD) camera image to the electron-flux distribution on the phosphor screen is demonstrated as the basis of two dimensional (2D) analyses of non-neutral plasma dynamics. We present a fast and sufficiently accurate procedure to construct the potential and the electric field distribution from the observed 2D images. Such field analyses are essential for deep and extensive studies of vortex dynamics or turbulence. Using this procedure, we quantitatively compare the image diagnostics by sector probing for the first time to show that core dynamics which is observed clearly by imaging is severely obscured by probing; thus, its application should be limited to simple dynamics of a small number of discrete distributions of particles.

Keywords:non-neutral plasma, image diagnostics, sector probe measurement, vortex dynamics

[Att.P-3] A. Sanpei, Y. Kiwamoto, K. Ito, "Generation of Vorticity Hole Surrounding a Point Vortex", J. Phys. Soc. Jpn. Vol.70, pp.L2813-2816 (2001).

Depleted regions (holes) in the vorticity distribution of a nonneutral plasma often play a controlling role in the evolution of two-dimensional turbulence. We report experimental investigations of the generation process of ring holes surrounding strongly-peaked clumps of vorticity (point vortex) immersed in the background of a spatially extended vorticity distribution, and determine the empirical scaling for the generation time of the ring holes.

KEYWORDS: electron plasma, vortex dynamics, two-dimensional turbulence

[Att. P-4] Y. Yatsuyanagi, Y. Kiwamoto, T. Ebisuzaki, T. Hatori, T. Kato, "Simulations of diocotron instability using a special-purpose computer, MDGRAPE-2", Phys. Plasmas, Vol.10, No.8 pp.3188-3195 (2003) .

The diocotron instability in a low-density non-neutral electron plasma is examined via numerical simulations. For the simulations, a current-vortex filament model and a special-purpose computer, MDGRAPE-2 are used. In the previous work, a simulation method based on the current-vortex filament model, which is called "current-vortex method" is developed. It is assumed that electric current and vorticity have discontinuous filamentary distributions, and both point electric current and point vortex are confined in a filament, which is called "current-vortex filament." In this paper, the current-vortex method with no electric current is applied to simulations of the non-neutral electron plasma. This is equivalent to the traditional point-vortex method. MDGRAPE-2 was originally designed for molecular dynamics simulations. It accelerates calculations of the Coulomb interactions, the van der Waals interactions and so on. It can also be used to accelerate calculations of the Biot-Savart integral. The diocotron modes reproduced by the simulations agree with the result predicted by linear theory. This indicates that the current-vortex method is applicable to problems of the non-neutral plasma. The linear growth rates of the diocotron instability in the simulations also agree with the theoretical ones. This implies that MDGRAPE-2 gives the sufficiently accurate results for the calculations of the current-vortex method. A mechanism of merging of electron clumps is demonstrated by the simulations. It is concluded that the electric field induced by the conducting wall makes the nonlinear stage unstable and causes the clumps to merge.

[Att. P-5] A. Sanpei, Y. Kiwamoto, K. Ito, Y. Soga, "Formation of a Vortex Crystal Cell Assisted by a Background Vorticity Distribution" , Phys. Rev. E. Vol.68, No.1-2, 016404 (6 pages) (2003).

A vortex crystal is a quasistationary, symmetric array of intense vortices (clumps). A low level of background vorticity is experimentally observed to assist three clumps in forming an equilateral

triangle starting from initial positions on a linear array. The triangle constitutes a unit cell of a crystal in a many-vortex system. The background vortex curbs the orbital motion of the clumps with unequal strengths to arrest them at the vertices of an equilateral triangle by wrapping them with different sized belts of depleted vorticity ~ring holes!. We characterize the contributions of a low-level background vorticity distribution on the formation of ordered states of clumps in light of the experimental results and existing theories.

[Att. P-6] Y. Soga, Y. Kiwamoto, A. Sanpei and J. Aoki, "Merger and binary structure formation of two discrete vortices in a background vorticity distribution of a pure electron plasma", Phys. Plasmas, Vol.10, No.10 pp.3922-3926 (2003).

Observations have shown that two discrete vortices (clumps) immersed in a broad profile of background vorticity merge quickly or form a binary state that lasts for a long period. The different paths of the vortical evolution critically depend on slight differences in the initial background vorticity distribution (BGVD). By a fine control of the BGVD the asymptotic inter-clump distance is found to be a two-valued function of $b / \frac{2}{b}$, where b is the BGV at the initial location of the clumps, corresponding to the merger and the binary state. The multiplicity is removed by considering the degree of depletion of BGVD between two clumps at the time of their proximity in the initial phase.

[Att. P-7] 際本泰士 : 「非中性プラズマ科学への期待」 プラズマ・核融合学会誌 Vol.79, No.12 pp.1249-1258 (2003).

A review is made on the present status of nonneutral plasma with a particular interest in search of a new frontier to plasma physicists engaged in basic researches. The author does not intend to be exhaustive nor well balanced in the description, but tries to discuss where we are positioned and what we might be able to do to fruitfully enjoy plasma physics and extend its field of activity. Leaving most of topics to the cited references, the author describes characteristic features of nonneutral plasmas appearing in distinct confinement properties, equilibria, transport, nonlinear evolution of Kelvin-Helmholtz instability, and fluid echo phenomena. These examples may hopefully convey the significance of nonneutral plasma science as one of newly-rising branches of plasma physics and as a potentially relevant channel through which plasma physics could explore into new dimensions.

[Att. P-8] Y. Kiwamoto, A. Mohri, M. Fujiwara, "Equilibrium Density Distribution of a Two-Species Plasma with a Single Sign of Charge", J. Phys. Soc. Jpn. Vol.73, No.1

pp.102-106 (2004).

The equilibrium density distribution of a nonneutral plasma consisting of two species of particles is studied theoretically on a basis of a cold two-fluid model. We request an equilibrium state with rigid rotation and seek the distribution with minimum energy satisfying the conservation of the particle numbers and the canonical angular momentum. The analysis indicates that the overlapping of the distributions of the fluids is allowed only while the total density is below the Brillouin density limit of the heavier fluid. With increasing number of the lighter particles the heavier fluid is pushed out and surrounds the lighter fluid with increasing radial separation. The rotation of the heavier fluid changes from the low frequency branch to the upper branch as the density of lighter particles further increases. When the number of the heavier particles rotating in the low branch is increased, the inner edge of the heavier fluid shrinks to compress the lighter fluid, but when the rotation is switched to the upper branch the outer edge of the lighter fluid expands.

KEYWORDS: nonneutral plasma, multispecies plasma, Brillouin density limit, mass separation

[Att. P-9] Y. Soga, Y. Kiwamoto, A. Sanpei and J. Aoki, "Radial Compression of Density Profile of a Pure Electron Plasma by Application of External Torque", to appear in J. Plasma Fusion Research, SERIES 6 (2004).

We report a preliminary experimental study focused on controlling the density distribution of a pure electron plasma confined in the Malmberg-Penning trap by application of external torque. Substantial radial compression of the density distribution is observed by application of a properly controlled rotating electric field. Preliminary analyses of the wave propagating in the plasma in terms of the frequency spectra and correlation function indicate that plasma selectively absorbs the energy of the driver field to support a wave that fits the profile of the plasma and that the excited wave shows a spectrum which occasionally shifts from the driver wave by 40kHz.

Keywords: nonneutral plasma, rotating wall, wave torque, plasma compression

[Att. P-10] J. Aoki, Y. Kiwamoto, Y. Soga and A. Sanpei, "High Fidelity Optical Transfer System for Two-Dimensional Imaging of Density Distribution of a Pure Electron Plasma", accepted for publication in Jpn. J. Appl. Phys. (2004).

A simple-structured imaging system is constructed for observing two-dimensional electron density distributions with a wide dynamic range and a high spatial resolution. It consists of a phosphor plate, an image-transfer lens system and a charge-coupled-device (CCD) camera. Reliable operation of the CCD camera for experiments in a strong magnetic field (< 2.2 T) requires positioning the camera remote from the plasma trap. We have successfully introduced a three-lens

system to transfer the phosphor images to the camera with low distortion and a high optical efficiency. The luminosity distribution of the CCD camera image is observed to be proportional to the axially-integrated two-dimensional distribution of electrons. This proportionality is confirmed over a wide dynamic range of 15:60000 in the counting at each pixel of the CCD. Based on the linear relationship a quantitative analysis is demonstrated for an image data taken from a vortex experiment encompassing the fluctuation level of 15 in the background and the peak value exceeding 30000 of an electron clump.

KEYWORDS: electron plasma, vortex dynamics, two-dimensional density distribution, imaging, optical image transfer

[Att. P-11] Y. Kiwamoto, J. Aoki and Y. Soga, "Potential Distribution of Nonuniformly Charged Ellipsoid", to be published in Physics of Plasmas Vol.11, No.10 (2004).

A convenient formula is obtained for fast calculation of the three-dimensional potential distribution associated with a spatially varying charge-density distribution by reconstructing it as a superposed sets of nested spheroidal shells. It is useful for experimental analyses of near-equilibrium states of nonneutral plasmas and for quick evaluation of the gravity field associated with stellar mass distributions.

[Att. P-12] J. Aoki, Y. Kiwamoto and Y. Soga , "Novel Application of Electron Vortex Dynamics to the Alignment of Magnetic and Cylinder Axes", submitted to Jpn. J. Appl. Phys. (2004).

We have developed a novel application of vortex motion of pure electron plasmas to a new scheme of the evaluation and amendment of misalignments between the magnetic axis and the wall axis. This scheme consists of the observation of circular orbits of electrons confined locally in two axially-separated short traps. The analyses of the orbits' radii and the centers of the trajectories lead to precise determination of the extents of misalignments and indicate the direction and the amount of the displacement to be taken for the better alignment. We report an example of the procedure which has been successfully applied to the alignment of multi-ringed electron/ion trap to be operated in a strong magnetic field variable up to 2.2T.

KEYWORDS: axial alignment, magnetic axis, nonneutral plasma, electron vortex